

07;12

О влиянии концентрации рассеивающих частиц на степень когерентности зондирующих пучков, качество сигналов и точность измерения интерферометрических систем

© В.С. Соболев, Е.Н. Уткин, Г.А. Кащеева

Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: sobolev@iae.nsk.su

(Поступило в Редакцию 18 октября 2011 г. В окончательной редакции 12 марта 2012 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния концентрации рассеивающих частиц, находящихся в мутной среде, на когерентность зондирующих лучей, статистические характеристики получаемых сигналов и точность измерения интерферометрических систем. Показано, что даже при малой исходной мощности зондирующих пучков (порядка 10 мВт) и очень высокой концентрации рассеивающих частиц, ослабляющих входную мощность в сотни раз, световые пучки практически полностью сохраняют временную и пространственную когерентности, а создаваемая ими интерференционная картина обладает высокой контрастностью. Спектральные характеристики сигнала, отношение сигнал—шум и точность измерений практически не изменяются.

Введение

При проведении гидроаэродинамических измерений в мутных средах и исследовании характеристик потоков методами лазерной доплеровской анемометрии зондирующие и рассеянные световые пучки проходят большие расстояния в задымленном воздухе или в загрязненной жидкости. Примерами таких экспериментов могут служить измерения скоростей потоков в вихревых камерах или исследования характеристик обтекания моделей судов в опытных гидродинамических бассейнах. Опыт проведения подобных исследований [1,2] говорит о том, что наличие многих рассеивающих частиц на пути зондирующих пучков может привести к существенному ослаблению их интенсивности и даже к невозможности получать достоверные результаты измерений. Аналогичные ситуации могут возникать и в других интерферометрических системах, работающих в мутных средах.

Проблеме рассеяния света и его прохождения сквозь дисперсные среды посвящено огромное количество публикаций. В качестве примера укажем на их часть, касающуюся рассеяния когерентного излучения [3–7]. Анализ этих работ показал, что исчерпывающей информации относительно влияния концентрации рассеивающих частиц на характеристики получаемых сигналов и качество работы интерферометрических систем они не содержат. Мало того, в некоторых из них [4,8,9] высказывается мнение о том, что после прохождения рассеивающей среды когерентные свойства излучения должны теряться из-за нарушения корреляции фаз в силу случайного расположения рассеивающих частиц. В то же время отметим, что в наиболее близкой к рассматриваемой проблеме работе [7] с помощью интерферометра Рэлея показано, что даже при очень высокой концентрации рассеивающих частиц прошедший свет сохраняет высокую когерентность. К сожалению, этот вывод получен для

случая прохождения света не через пространственно-рассеивающую среду, а сквозь достаточно тонкие молочные стекла. Отметим, что даже в одной из последних монографий [10], посвященной проектированию оптико-электронных устройств, предназначенных для работы в условиях рассеивающих сред, вопросы влияния концентрации рассеивающих частиц на точность получаемых результатов не получили должного освещения.

Постановка задачи

Целью настоящей работы является представление и обсуждение результатов проведенных экспериментальных исследований, относящихся к оценке степени когерентности зондирующих лучей, статистических характеристик получаемых сигналов, точности измерений при значительных изменениях концентрации рассеивающих частиц на примере использования лазерной доплеровской измерительной системы.

Вначале, чтобы иметь представление о том, как параметры получаемого доплеровского сигнала связаны с концентрацией рассеивающих частиц (без учета влияния тех из них, которые находятся вне измерительного объема), приведем данные теории [11] об изменении с концентрацией таких основных параметров доплеровского сигнала, как его среднее значение, среднеквадратичное отклонение и отношение сигнал—шум. Среднее значение пропорционально концентрации рассеивающих частиц, а среднеквадратичное значение его переменной (доплеровской) составляющей пропорционально корню квадратному из концентрации.

Что касается отношения сигнал—шум, то под сигналом будем понимать среднеквадратичное значение доплеровской компоненты, а в качестве шума учтем только дробовой шум. Поскольку [11], дробовой шум пропорционален корню квадратному из среднего значения сигнала

(т.е. из концентрации частиц), а среднее квадратичное значение полезного сигнала также пропорционально корню квадратному из концентрации, то ясно, что отношение сигнал—шум от концентрации частиц не зависит.

Далее перейдем к экспериментальным оценкам роли тех частиц, которые находятся во всем объеме камеры, через которую проходят зондирующие пучки.

Эволюция спектральной плотности доплеровского сигнала и отношения сигнал—шум под влиянием увеличения концентрации рассеивающих частиц

Цель этого эксперимента состоит в том, чтобы сравнить поведение спектра доплеровского сигнала и отношения сигнал—шум как функции концентрации рассеивающих части для случая, когда вследствие закона Бугера падает мощность зондирующих пучков, и для случая, когда соответственно изменяется мощность лазера, но на пути зондирующих пучков рассеивающие частицы отсутствуют. На первом этапе эксперимент проводился при условии, что концентрация дыма в камере медленно повышалась, а качество сигнала и отношение сигнал/шум контролировались с помощью анализатора спектра. На втором этапе дым отсутствовал, а в зондирующие пучки вводились нейтральные фильтры, которые, естественно, не влияли на их когерентность. Поглощение этих фильтров подбиралось точно таким же, какое производил дым. Мощность зондирующих пучков в начале эксперимента составляла 20 мВт.

Экспериментальная установка (рис. 1) представляла собой прямоугольную камеру 3 размерами $500 \times 400 \times 500$ мм с прозрачными стенками. В ее крышку было вмонтировано сопло 5, сквозь которое через гибкий патрубок 4 подавался задымленный воздух. Через боковые стенки камеры проходили зондирующие лучи 1 лазерного доплеровского анемометра (с дифференциальной схемой измерения). Область пересечения лучей — измерительный объем 6 — устанавливалась под центром сопла. В один из зондирующих лазерных лучей,

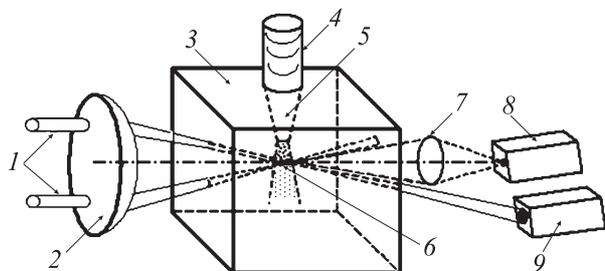


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — зондирующие пучки, 2 — фокусирующий объектив, 3 — прозрачная камера, 4 — гибкий патрубок от генератора дыма, 5 — сопло, 6 — измерительный объем, 7 — приемный объектив, 8 — фотоприемник доплеровского сигнала, 9 — измеритель мощности.

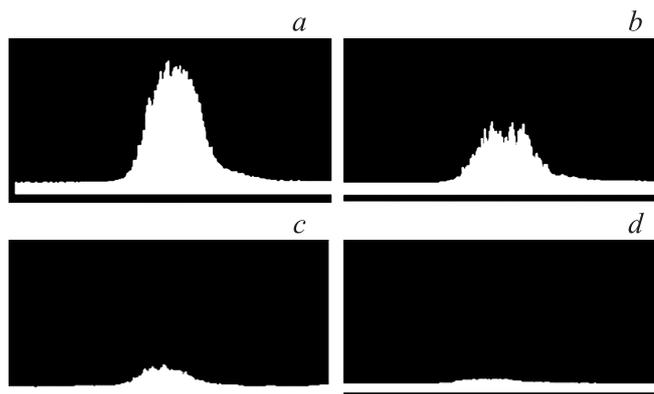


Рис. 2. Спектры доплеровского сигнала при возрастании концентрации дыма: *a* — спектр в отсутствие дыма. Мощность зондирующего пучка 8 мВт; *b* — спектр при наличии дыма с концентрацией, уменьшающей мощность зондирующего пучка до 4 мВт; *c* — спектр при наличии дыма с концентрацией, уменьшающей мощность до 2 мВт; *d* — спектр при концентрации дыма, уменьшающей мощность зондирующего пучка до 0.5 мВт.

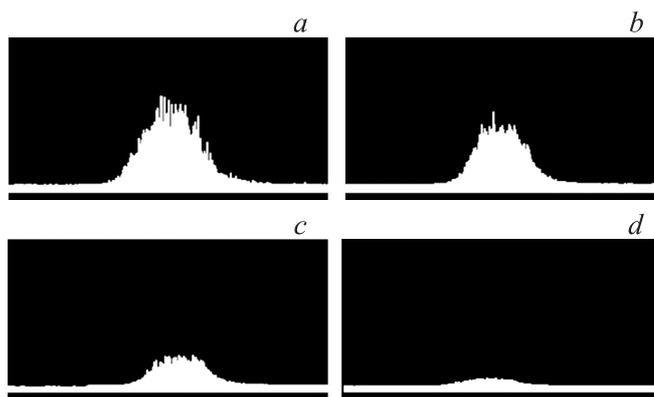


Рис. 3. Спектры доплеровского сигнала в отсутствие дыма при наличии поглощающих фильтров: *a* — спектр сигнала в отсутствие дыма и нейтрального фильтра. Мощность зондирующего луча 8 мВт; *b* — то же, но с нейтральным фильтром при мощности 4 мВт; *c* — то же, но при мощности 2 мВт; *d* — то же, но при мощности 0.5 мВт.

проходящих сквозь камеру, вводился измеритель мощности 9, позволяющий контролировать концентрацию дыма путем оценки снижения мощности света в этом луче. В качестве анализатора спектра использовался следящий фильтр—демодулятор доплеровского сигнала, описание которого представлено в [12].

Каждой операции оценки спектра предшествовало измерение мощности зондирующего луча. Отметим, что концентрация рассеивающих частиц в потоке воздуха, поступающего через сопло (т.е. создающих доплеровский сигнал), поддерживалась постоянной. При этом изменялась и измерялась только концентрация частиц в камере, т.е. на пути зондирующих пучков. Соответствующие картинки спектров, полученные на первом этапе, представлены на рис. 2, а на втором — на рис. 3.

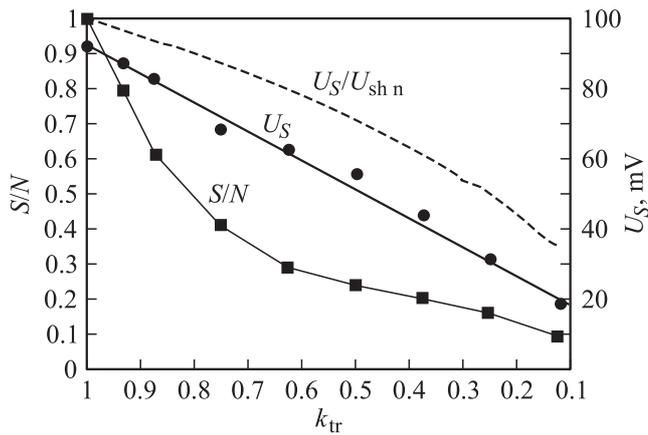


Рис. 4. Изменение среднеквадратичного значения доплеровского сигнала U_S и отношения сигнал–шум S/N как функций коэффициента пропускания рассеивающей среды k_{tr} .

Как следует из рис. 2, при увеличении концентрации рассеивающих частиц величина шума (подстилающий белый шум на рис. 2, $a-d$) практически не изменяется, в то время как мощность сигнала сильно деградирует. Рис. 3 демонстрирует аналогичное поведение спектров при наличии соответствующих поглощающих фильтров.

Анализируя полученную информацию, можно заключить, что даже при очень большой концентрации рассеивающих частиц, приводящей к ослаблению мощности зондирующих лазерных пучков в 10 раз, эволюции формы и значений спектральной плотности доплеровского сигнала остаются точно такими же, как и при соответствующем изменении мощности лазера в отсутствие дыма. Как это ни кажется парадоксальным, дым не разрушает когерентность лазерных пучков и не приводит к изменениям формы спектральной плотности.

Что касается изменения среднеквадратичных значений доплеровского сигнала и отношения сигнал–шум как функций концентрации дыма, то методика определения этих значений состояла в следующем: вначале при некоторой скорости потока рассеивающих частиц оценивалось среднеквадратичное значение суммы получаемого доплеровского сигнала и шума, а затем скорость потока устанавливалась равной нулю и оценивалось среднеквадратичное значение шума. Далее с учетом того, что сигнал и шум статистически независимы, вычислялось значение сигнала и отношение сигнал–шум. Соответствующие графики среднеквадратичных значений сигнала U_S и отношения сигнал–шум S/N как функции коэффициента пропускания среды (концентрации дыма) показаны на рис. 4. Здесь же штрихами представлен график изменения отношения сигнал–дробовой шум ($U_S/U_{sh,n}$) для случая, когда дым отсутствует, но мощность зондирующих лазерных пучков уменьшается до таких же значений, которые получаются при задаваемых значениях коэффициента пропускания.

Как следует из графиков рис. 4, сигнал U_S практически линейно падает с уменьшением коэффициента пропускания среды, что закономерно, так как коэффициент

пропускания пропорционален проходящей мощности, а отношение сигнал–шум падает нелинейно. Сравнение этого падения с падением отношения сигнал–шум при соответствующем изменении мощности лазера в отсутствие дыма показывает, что наличие дыма снижает отношение сигнал–шум намного быстрее, чем соответствующее изменение мощности в его отсутствие. Это явление может быть связано с тем, что мощность сигнала из-за наличия дыма падает еще и на пути между точкой измерения и фотоприемником.

Влияние концентрации рассеивающих частиц на точность оценки доплеровской частоты (скорости)

Чтобы определить, как концентрация рассеивающих частиц влияет на характеристики доплеровского сигнала и точность измерений скорости, представляет интерес оценить статистические характеристики мгновенной частоты доплеровского сигнала (среднее значение, среднеквадратичное отклонение, спектральную плотность и плотность вероятности) в присутствии и отсутствие дыма в камере. Для этого в точку пересечения лучей дифференциальной схемы лазерного анемометра помещался вращающийся стеклянный диск с нанесенными на него рассеивающими частицами и получающийся доплеровский сигнал демодулировался по частоте с помощью

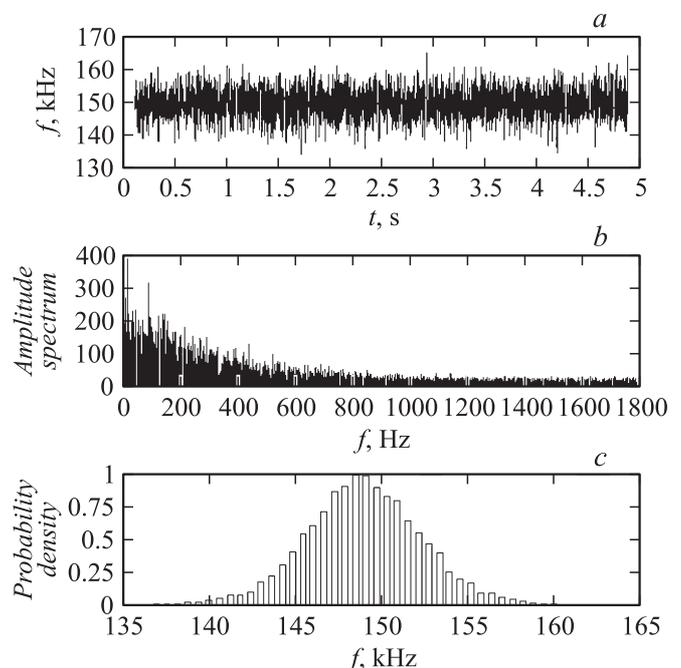


Рис. 5. Результаты эксперимента в присутствии дыма: a — реализация мгновенной частоты доплеровского сигнала при концентрации дыма, подавляющей начальную мощность в 20 раз; b — амплитудный спектр мгновенной частоты; c — нормированная на максимум плотность вероятности мгновенной частоты. Среднее значение частоты равно 149.2 kHz, среднеквадратичное отклонение составляет 2.4%.

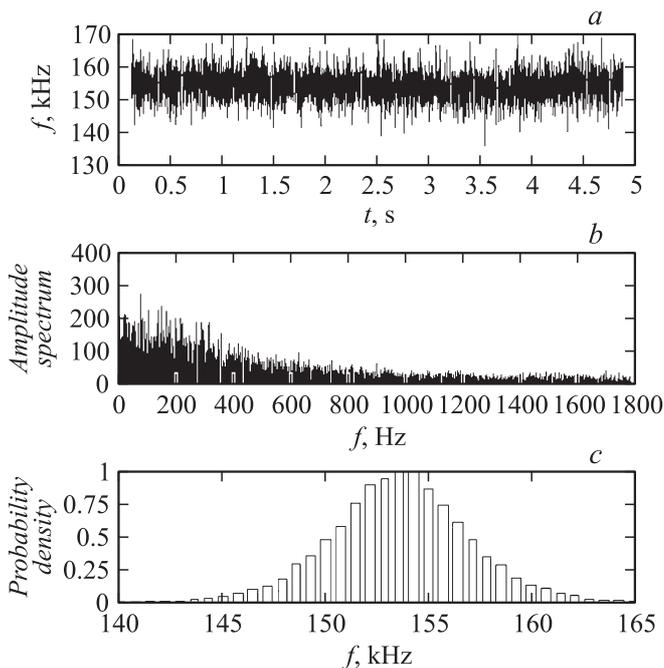


Рис. 6. Результаты эксперимента в отсутствие дыма: *a* — реализация мгновенной частоты доплеровского сигнала в отсутствие дыма; *b* — амплитудный спектр мгновенной частоты; *c* — нормированная на максимум плотность вероятности мгновенной частоты. Среднее значение частоты равно 149 kHz, среднеквадратичное отклонение составляет 2.31%.

прецизионного следящего фильтра [12]. В результате на выходе фильтра получалась реализация мгновенной частоты доплеровского сигнала, пропорциональная мгновенной линейной скорости диска. Эксперимент проводился при нескольких значениях концентрации дыма. На втором этапе, чтобы исключить влияние других источников помех, аналогичный эксперимент был проведен в отсутствие дыма, но при соответствующих изменениях мощности лазерных пучков с помощью нейтральных фильтров. Результаты этих экспериментов представлены на рис. 5 для случая, когда исходная мощность зондирующих пучков составляла 20 mW, а концентрация дыма ослабила эту мощность в 20 раз, и на рис. 6 — для случая отсутствия дыма, но с уменьшением начальной мощности в 20 раз с помощью нейтрального фильтра. Поскольку диск вращался с постоянной скоростью, то можно определить, повлияет ли концентрация дыма на погрешности в оценке скорости.

Удивительно, но, так же как в эксперименте с оценкой изменений спектральных плотностей доплеровского сигнала, среднеквадратичные отклонения мгновенной частоты, ее спектральная плотность и плотность вероятности в присутствии дыма и в его отсутствие практически не изменились. Влияние концентрации дыма оказалось аналогичным изменениям мощности лазера. То есть дым не портит когерентности зондирующих лучей, по крайней мере при концентрациях, соответствующих уменьшению мощности в 20 раз.

Оценка изменений степени когерентности зондирующих лучей как функции концентрации рассеивающих частиц

Чтобы окончательно убедиться в том, влияет ли присутствие дыма на когерентность зондирующих лучей, был проведен эксперимент с непосредственным измерением их когерентности. Для этого между передающим объективом и точкой пересечения зондирующих пучков дифференциальной схемы доплеровского анемометра была установлена кювета с дымом, в которой рассеяние света происходило на длине 40 см. Интерференционная картина, образованная этими пучками в измерительном объеме, сканировалась по линейному закону с помощью очень тонкой рассеивающей нити. Рассеянное излучение с помощью широкополосного фотоприемника преобразовывалось в доплеровский сигнал. Соответствующие осциллограммы представлены на рис. 7. Естественно, что для каждой мощности зондирующих лучей устанавливалась соответствующая чувствительность осциллографа.

Как следует из полученных интерферограмм, при всех значениях задымленности контрастность интерференционной картины полностью сохраняется, хотя их интенсивность вследствие наличия дыма падает в 500 раз. Степень когерентности, определяемая, как

$$\gamma = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}),$$

составила 0.7 и оставалась постоянной при всех концентрациях рассеивающих частиц. Здесь I_{\max} и I_{\min} — соответственно максимальное и минимальное значения интерферограммы.

Полученный результат можно интерпретировать следующим образом. Те фотоны, которые пролетают мимо частиц и не рассеиваются, образуют поле со стопроцентной когерентностью и создают в измерительном объеме

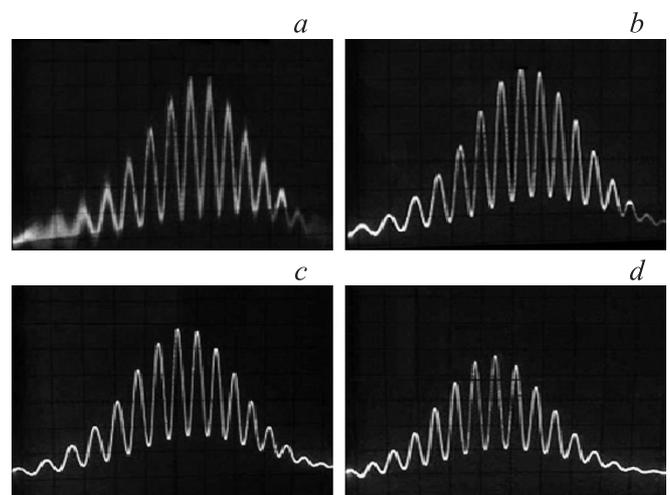


Рис. 7. Осциллограммы интерференционного сигнала при следующих значениях мощности излучения, mW: *a* — 0.016; *b* — 0.16; *c* — 1.6; *d* — 8 mW.

интерференционную картину высокой контрастности. Рассеянные фотоны вследствие малых размеров рассеивающих частиц разбрасываются в широком телесном углу и по направлению зондирующих лучей вклада в интерференционную картину практически не дают.

Заключение

Таким образом, все три эксперимента показали удивительное свойство лазерных лучей сохранять высокую когерентность при прохождении через плотные рассеивающие среды, даже такие, которые уменьшают их мощность в сотни раз. Это явление, как уже упоминалось, можно объяснить тем, что прошедшие сквозь рассеивающую среду не рассеянные фотоны естественным образом сохраняют свою когерентность, а рассеянные вследствие широкоугольного разброса их излучения на малых частицах существенного вклада в узкие зондирующие пучки не дают. Этот важный вывод касается не только лазерной доплеровской анемометрии, но и других применений лазерной интерферометрии в мутных средах.

Здесь еще раз следует упомянуть о том, что поведение фотонов как частиц, относящихся к бозонам, при достаточном их количестве хорошо описывается законами электромагнитного поля [13], и если они когерентны, то даже слабое поле не рассеянных фотонов будет полностью когерентным. Можно показать, что даже при мощности зондирующих пучков 10^{-9} W и длине волны 1μ количество фотонов в измерительном объеме составит $5 \cdot 10^9$, т. е. очень большую величину.

И еще один вывод. При работе лазерного анемометра в сильно замутненной среде, когда мощность зондирующих лучей значительно подавляется, для снижения величины неизбежного дробового шума необходимо применять либо достаточно мощные лазеры, либо высокочувствительные малошумящие фотоприемники.

Авторы благодарят А.М. Щербаченко за помощь в проведении ряда экспериментов.

Настоящая работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 08 08 00577, 2008–2010 гг.).

Список литературы

- [1] Аникин Ю.А. Автореф. канд. дис. Новосибирск. 2011.
- [2] Никулин В.В., Соболев В.С. и др. Труды XI Междунар. научно-техн. конф. „Оптические методы исследования потоков“ (ОМИП-2011), М.: Издательский дом МЭИ, 2011. С. 223–237.
- [3] Франсон М. Оптика спеклов, М.: Мир, 1980. 171 с.
- [4] Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах. М.: Мир, 1991. Т. 1. 280 с.
- [5] Боровой А.Г. // Опт. и спектр. 1983. Т. 54. Вып. 4. С. 757–759.
- [6] Дик В.П., Иванов В.А., Лойко В.А. // ЖПС. 1971. Т. 18. № 4. С. 666–670.
- [7] Войшвилло Н.А., Щербакова Н.И., Процышин И.В. // Оптико-механическая промышленность. 1984. № 5. С. 1–4.
- [8] Розенберг Г.В. // Наука и техника. 1971. № 6. С. 150–180.
- [9] Соболев В.В. Рассеяние света в атмосферах планет. М.: Наука, 1972. 335 с.
- [10] Терентьев В.Е. Моделирование электрических цепей и систем с оптикоэлектронными устройствами. СПб.: ФАМРТ, 2009. 201 с.
- [11] Коронкевич В.П., Соболев В.С., Дубнищев Ю.Н. Лазерная интерферометрия. Новосибирск: Наука, 1983. 213 с.
- [12] Соболев В.С., Столповский А.А., Щербаченко А.М., Кащеева Г.А., Уткин Е.Н. // Автметрия. 2006. № 1. С. 103–116.
- [13] Тарасов Л.В. Физические основы квантовой электроники. М.: URSS. 2009. 368 с.